



ウェアラブル活動量推定デバイスの高精度化および低消費電力化に関する研究

中西, 基文

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-09-25

(Date of Publication)

2019-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7309号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007309>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

(氏名： 中西 基文 NO.1)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 中西 基文 _____

専 攻 _____ 情報科学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

ウェアラブル活動量推定デバイスの高精度化および

低消費電力化に関する研究

指導教員 _____ 三浦 典之 _____

(注) 2, 000 字~4, 000 字でまとめること。

近年、生活習慣病の予防とともに健康寿命の延伸に対する取り組みが重要視されるようになってきている。生活習慣病予防と健康寿命の延伸に対して身体活動の増加が特に効果的であることはよく知られている。そのためには、日常生活における身体活動を正確に把握することが重要となる。身体活動の把握として、その頻度(Frequency)、強度(Intensity)、時間(Time)、種類(Type)の FITT と呼ばれる 4 指標の記録が重要であり、生活習慣改善に向けた指導で広く利用されている。それらのデータは日常生活の中で長期的かつ連続して計測すること、なにより正確に計測することが求められている。正確で、長期間の連続した身体活動データは、生活習慣病を予防し、健康寿命の延伸を促進するためのより良い健康指導・生活指導の提供につながるため、それが実現できるウェアラブルデバイスが強く求められている。

身体活動を記録するための数多くのウェアラブルデバイスが開発、報告されており、特に身に着けるタイプのウェアラブルウェアラブルデバイスに注目が集まっている。それらのウェアラブルデバイスの多くは加速度センサを用いて FITT を推定している。しかしながら、現在広く利用されているウェアラブルデバイスには以下の 3 点の課題がある。

第 1 の課題はエネルギー消費量を正確に推定できない行動があることである。例えば階段上りがその行動に当たる。階段上りはエネルギー消費量が非常に大きく歩行時の 2 倍程度あるのに対して、加速度信号は小さく歩行時と同程度となる。そのため加速度のみでは正確にエネルギー消費量を推定することができない。

第 2 の課題として長時間の連続使用に向けたウェアラブルデバイスの小型化である。長期間の連続した記録のためには装着が容易かつ日常生活を妨げないように、できる限り小型・軽量のウェアラブルデバイスであることが望ましい。ウェアラブルデバイスは身に着けることを前提として小型軽量を重視した設計のため、その目的には非常に適していると考えられる。ウェアラブルデバイスの小型・軽量化ためには必要となる部品点数削減と電池サイズを小さくすることが効果的な手段である。しかしながら、単純にその手段を取り入れるだけでは、FITT の正確な記録に必要な機能が失われる、ウェアラブルデバイスの駆動時間が短くなってしまふという課題が発生する。

第 3 の課題が長時間連続動作を可能とする低消費電力化である。現状のウェアラブルウェアラブルデバイスの連続駆動時間は約 2 週間程度であり長期間動作とは言えない。低消費電力化が進むことで電池交換、充電といった煩わしい行為を長期間必要とせずに連続使用が可能となる。加えてウェアラブルデバイスに使用する電池サイズも小型化することができるため、低消費電力化は第 2 の課題の解決にも重要な役割を果たす。

(氏名： 中西 基文 NO.2)

本来の目的である長期間の連続した FITT の正確な記録を可能とするためにも、低消費電力化技術は強く求められている。

そこで本研究ではこれら 3 点の課題を解決する事を目的とし身体活動量としてのエネルギー消費量と運動・行動種類を高精度に推定するアルゴリズムの開発とそのアルゴリズムを活用したウェアラブルデバイスの小型化技術と長期間の連続動作を実現させることを目標とし低消費電力化に関する研究を行った。本論文は全 7 章で構成され、第 1 章は序論である。

第 2 章では、ウェアラブルデバイスが抱える課題について述べる。ウェアラブルデバイスは健康増進を目的として広く普及した。しかしながら、現状では上述の通り消費エネルギー量の推定精度、ウェアラブルデバイスの小型化、そして低消費電力化という 3 点の課題がある。本章ではそれらの詳細について述べる。

第 3 章では、従来正しく推定ができていなかった階段上り時におけるエネルギー消費量をより正しく推定するためのアルゴリズムを提案する。そのアルゴリズム開発のために 42 名の被験者による臨床試験を実施した。その結果をもとに新たな行動分類アルゴリズムとエネルギー消費量の指標の一つである METs(Metabolic Equivalents)推定モデルを開発した。そのアルゴリズムは leave-one-out cross validation を用いて最適モデルを決定、その推定精度を検証した。結果、その最適モデルでは階段上りにおいては従来の推定アルゴリズムに対して絶対誤差(MAPE)で約 84%の精度向上が確認できた

第 4 章は、ウェアラブルデバイスの小型化に向けた SoC(System-on-Chip)の開発に取り組む。ウェアラブルデバイスの小型化には回路を構成する部品点数の削減と電池サイズの縮小が効果的である。そこで本章では、第 3 章で提案したアルゴリズムが動作する SoC の開発を行うことで部品点数の削減を行った。加えて、加速度信号に対するフィルタリング処理を実行できるハードウェアを SoC 内部に集積することで、CPU コアのアクティブ率削減を実現した。試作した SoC、加速度センサ(KX022; Kionix, Inc.), NFC 通信 IC、および CR1220 バッテリーを備えた身体活動モニタリングが可能なアプリケーションボードを開発。そのサイズは 23×21 mm であり、小型のウェアラブルデバイスを開発した。本章ではシミュレーションにより、開発された SoC による消費電力削減効果を検証した。その結果、信号処理をすべてソフトウェアで実行した場合の消費電流が 42.6 μA であるのに対し、SoC 内部に実装されたハードウェアを利用した場合には 25.9 μA での動作が可能となり、約 39 %の電力削減効果が確認できた。

(氏名： 中西 基文 NO.3)

第 5 章では第 4 章にて提案した SoC を用いて、サンプリングレートの段階的適応制御(SACS)による低消費電力技術の開発を行った。これは加速度センサのサンプリングレートを行動分類に応じて適応的に変化させることで低消費電力を実現する技術である。本章では、提案方法による消費電力の削減効果と、エネルギー消費量推定精度について検証した。実使用を想定したシミュレーション結果では、提案するウェアラブルデバイスは 11.3 μA で動作し、第 4 章の結果である 25.9 μA に対して、約 56 %の電力削減効果が確認できた。加えてサンプリングレートの変更頻度が高い場合でもエネルギー消費量推定精度においても、サンプリングレート固定(Fixed)に対する RMSE(Root Mean Square Error)で 0.14 METs 程度と SACS を用いる事による誤差は非常に小さなものであることが確認できた。

第 6 章では、重力加速度を考慮した行動分類とサンプリングレートの適応的直接制御方式(DACS)を開発した。第 5 章では SACS を利用することによる低消費電力化効果を評価した。本章では、重力加速度の影響を考慮した行動分類方法の高精度化と、行動分類に応じてサンプリングレートを特定の周波数へと直接的に変化させる DACS を提案した。DACS を用いることで、実測の METs 値に対する絶対誤差は、Fixed に比べて 0.1METs 以下であり、差はないことが臨床試験からも確認された。加速度センサのアクティブレートも第 5 章で述べた実使用を想定したシミュレーションにより、SACS に対して、加速度センサのアクティブレートを約 23 %削減することができた。これは、システムが約 9.8 μA での動作が期待できる結果であった。

最後に第 7 章において本論文の結論を述べる。従来のアルゴリズムでは推定が困難であった特定の行動における推定精度向上を実現するアルゴリズムの開発ができた。また、そのアルゴリズムを実装する SoC の開発、小型化と低消費電力化に向けた新規回路を搭載した。試作したチップサイズは 5 mm × 4 mm と非常に小型であり、身体活動モニタリングが可能なアプリケーションボードも 21 mm × 23 mm であり、非常に小型なウェアラブルデバイスを実現できた。消費電力も人の活動時における消費エネルギーの推定精度を維持しつつ、11.3 μA での動作を実現した。これは 40 mAh の Li-ion 電池を使用した場合、約 147 日間の連続動作が可能となり、一般的なウェアラブルデバイスの 7 日間に対して約 20 倍の長寿命化が達成できた。加えて、重力加速度を考慮した行動分類とサンプリングレートの適応的直接制御方式を採用することで、システム全体で、約 9.8 μA での動作が期待できる結果を示せた。

(氏名： 中西 基文 NO.4)

本論文では、現状のウェアラブルデバイスが抱えている課題である推定精度の向上とウェアラブルデバイスの小型化と長期間の連続動作の両立を可能とする低消費電力技術の開発を通じて、ウェアラブル応用可能な活動量推定デバイスの高精度化および低消費電力化技術を確立できた。

氏名	中西 基文		
論文 題目	ウェアラブル活動量推定デバイスの高精度化および低消費電力化に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	川口 博
	副査	教授	太田 能
	副査	教授	熊本 悦子
	副査	准教授	三浦 典之
			印

要 旨

概要

近年、生活習慣病の予防とともに健康寿命の延伸に対する取り組みが重要視されるようになってきている。生活習慣病予防と健康寿命の延伸に対して身体活動の増加が特に効果的であることはよく知られている。そのため、日常生活における身体活動を正確に把握することが重要となる。身体活動の把握として、その頻度(Frequency)、強度(Intensity)、時間(Time)、種類(Type)の FITT と呼ばれる 4 指標の記録が重要であり、改善に向けた指導で広く利用されている。それらのデータは日常生活の中で長期的かつ連続して計測すること、なにより正確に計測することが求められている。正確で、長期間の連続した身体活動データは、生活習慣病を予防し健康寿命の延伸を促進するためのより良い健康指導・生活指導の提供につながるため、それが実現できるデバイスが強く求められている。

近年では、身体活動を記録するための数多くのデバイスが開発、報告されており、特に身に着けるタイプのウェアラブルデバイスに注目が集まっている。それらのウェアラブルデバイスの多くは加速度センサを用いて FITT を推定している。現在、広く利用されているウェアラブルデバイスには以下の 3 点の課題がある。

第 1 の課題はエネルギー消費量を正確に推定できない行動があることである。例えば階段上りはその行動に当たる。階段上りはエネルギー消費量が非常に大きく歩行時の 2 倍程度であるのに対して、加速度信号は小さく歩行時と同程度となる。そのため加速度のみでは正確にエネルギー消費量を推定することができない。

第 2 の課題として長時間の連続使用に向けたデバイスの小型化である。長期間の連続した記録のためには装着が容易かつ日常生活を妨げないように、できる限り小型・軽量のデバイスであることが望ましい。ウェアラブルデバイスは身に着けることを前提として小型軽量を重視した設計のため、その目的には非常に適していると考えられる。ウェアラブルデバイスの小型・軽量化ためには必要となる部品点数削減と電池サイズを小さくすることが効果的な手段である。しかしながら、単純にその手段を取り入れるだけでは、FITT の記録に必要な機能が失われる、デバイスの駆動時間が短くなってしまいうという課題が発生する。

第 3 の課題が長時間連続動作を可能とする低消費電力化である。現状のウェアラブルデバイスの連続駆動時間は約 2 週間程度であり長期間動作とは言えない。低消費電力化が進むことで長期間電池交換、充電といった煩わしい行為を必要とせずに連続使用が可能となる。加えてデバイスに使用する電池サイズも小型化することができるため、低消費電力化は第 2 の課題の解決にも重要な役割を果たす。本来の目的である長期間の連続した FITT の正確な記録を可能とするためにも、低消費電力化技術は強く求められている。

そこで本研究ではこれら 3 点の課題を解決する事を目的とし身体活動量としてのエネルギー消費量と運動・行動種類を高精度に推定するアルゴリズムの開発とそのアルゴリズムを活用したデバイスの小型化技術と長期間の連続動作を実現させることを目標とし研究を行った。本論文は全 7 章で構成され、第 1 章は序論である。

第 2 章では、ウェアラブルデバイスが抱える課題について述べている。

第 3 章では、従来正しく推定ができていなかった階段上り時におけるエネルギー消費量をより正しく推定するためのアルゴリズムを提案している。そのアルゴリズム開発のために 42 名の被験者による臨床試験を実施した。その結果をもとに新たな行動分類アルゴリズムとエネルギー消費量の指標の一つである METs(Metabolic Equivalent)推定モデルを開発した。そのアルゴリズムは leave-one-out cross validation を用いて最適モデルを決定、その推定精度を検証した。結果、その最適モデルでは階段上りにおいては従来の推定アルゴリズムに対して 83%の精度向上を確認している。

氏名	中西 基文		
第 4 章は、デバイスの小型化に向けた SoC(System-on-Chip)の開発に取り組んでいる。デバイスサイズの小型化には回路を構成する部品点数の削減と電池サイズの縮小が効果的である。そこで本章では、心拍測定回路とバッファメモリを内蔵し、第 3 章で提案したアルゴリズムが動作する SoC の開発を行うことで部品点数の削減を行った。加えて、加速度信号に対するフィルタリング処理を実行できる HW を SoC 内部に実装することで、CPU コアのアクティブ率削減を実現している。試作した SoC、加速度センサ(KX022; Kionix, Inc.)、NFC 通信 IC、および CR1220 バッテリを備えた身体活動モニタリングが可能なアプリケーションボードを開発。そのサイズは 23×21 [mm] であり、小型のデバイスを開発した。本章ではシミュレーションにより、開発された SoC によるデバイスの小型化とその消費電力削減効果を検証した。その結果、信号処理をすべてソフトウェアで実行した場合の消費電流が 42.6[μ A]であるのに対し、SoC 内部に実装されたハードウェアを利用した場合には 25.9[μ A]での動作が可能となり、約 39%の電力削減効果を確認している。			

第 5 章では第 4 章にて提案した SoC を用いて、アダプティブサンプリングによる低消費電力生体情報システムの開発を行っている。加速度センサのサンプリング周波数を行動分類に応じて適応的に変化させることで低消費電力を実現している。本章では、提案方法による消費電力の削減効果と、エネルギー消費量推定精度について検証した。実使用を想定したシミュレーション結果では、提案するデバイスは 11.8[μ A]で動作し、第 4 章の結果である 25.9[μ A]に対して、約 56%の電力削減効果が確認できた。加えてエネルギー消費量推定精度においても、サンプリング周波数を固定している場合に対する RMSE(Root Mean Square Error)で 0.14METs 程度と周波数変更に伴う誤差は非常に小さなものであることを確認している。

第 6 章では、重力加速度を考慮した行動分類とサンプリング周波数制御方式を開発した。第 5 章ではアダプティブサンプリングを利用することによる低消費電力化効果を確認したのに対して、本章では、重力加速度の影響を考慮した行動分類方法の高精度化と、行動分類に応じてサンプリング周波数を特定の周波数へと直接的に変化させる制御方法を提案している。提案手法を用いることで、実測の METs 値に対する絶対誤差は、周波数固定した場合に比べて 0.1 以下であり差はないことが臨床試験からも確認された。加速度センサのアクティブレートも第 5 章で述べた 実使用を想定したシミュレーションにより、第 5 章で提案した方法に対して、約 23%削減することができた。これにより、約 9.8[μ A]での動作が期待できる。

最後に第 7 章において本論文の結論を述べている。

本論文では、現状のウェアラブルデバイスが抱えている課題である推定精度の向上とデバイスサイズの小型化と長期間の連続動作の両立を可能とする低消費電力技術の開発を通じて、ウェアラブル応用可能な活動量推定デバイスの高精度化および低消費電力化技術を確立できた。以上の本研究成果を 2 本の査読付き英文論文誌、2 本の査読付き国際学会プロシーディングにて掲載または採録されている。よって提出された論文は、システム情報学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の中西 基文氏は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。